

室温半导体红外光电探测器研究进展

谢 天^{1,2}, 叶新辉^{1,2}, 夏 辉², 李菊柱^{2,3}, 张帅君^{1,2}, 姜新洋^{2,4}, 邓伟杰^{2,4},
王文静^{2,3}, 李玉莹², 刘伟伟², 李 翔^{1*}, 李天信^{2*}

(1. 上海理工大学 材料科学与工程学院, 上海 200093;

2. 中国科学院上海技术物理研究所 红外物理国家重点实验室, 上海 200083;

3. 上海师范大学 数理学院, 上海 200234;

4. 上海科技大学 物质科学与技术学院, 上海 201210)

摘要: 室温工作将为光子型红外探测开辟更广泛的应用, 系统整理和分析了从近红外到长波红外的 III-V 族及 II-VI 族半导体探测器的室温性能, 讨论不同材料体系和器件结构的室温暗电流机制。其中 InAs/GaSb 等二类超晶格的短周期带间级联结构以及 HgCdTe 抑制俄歇过程的方案在提升中长波红外室温探测性能方面都显示出了独特的优势。这些电子学结构的设计与近年来亚波长光子结构增强耦合、降低暗电流的新进展相结合, 有望实现近室温工作的高灵敏红外探测。

关键词: 室温红外光电探测; 暗电流机制; 带间级联; 碲镉汞; 亚波长光子结构

中图分类号: TN215 文献标识码: A

Research progress of room temperature semiconductor infrared photodetectors

XIE Tian^{1,2}, YE Xin-Hui^{1,2}, XIA Hui², LI Ju-Zhu^{2,3}, ZHANG Shuai-Jun^{1,2}, JIANG Xin-Yang^{2,4}, DENG Wei-Jie^{2,4}, WANG Wen-Jing^{2,3}, LI Yu-Ying², LIU Wei-Wei², LI Xiang^{1*}, LI Tian-Xin^{2*}

(1. School of Materials Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. State Key Laboratory of Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

3. Mathematics and Science College, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China;

4. School of Physical Science and Technology, Shanghai Tech University, Shanghai 201210, China)

Abstract: Room temperature operation of infrared photon detectors will open up a wider range of applications. This article summarizes the room temperature performance and dark current mechanism of semiconductor devices from near infrared to long wavelength infrared. Different methods to suppress dark current including the design of the interband cascade structure of InAs/GaSb type II superlattices and the nonequilibrium operation mode of HgCdTe to suppress the Auger process show unique advantages. These electronic structural designs, combined with the latest progress in subwavelength photonic structures to enhance light coupling and reduce dark current, hold the promise to achieve a high performance infrared imaging chip operating in room temperature in the near future.

Key words: room temperature infrared detection, dark current mechanism, interband cascade, HgCdTe, subwavelength photon structure

收稿日期: 2019-12-31, 修回日期: 2020-05-07

Received date: 2019-12-31, Revised date: 2020-05-07

基金项目: 中科院青促会会员(2018276); 中国科学院先导 B(XDB43010200, XDB43010400)

Foundation items: Supported by Member of the Youth Promotion Association of the Chinese Academy of Sciences(2018276); Chinese Academy of Sciences Pilot B(XDB43010200, XDB43010400)

作者简介(Biography): 谢天(1993-), 男, 江苏南京人, 硕士研究生, 主要研究领域为红外量子阱探测器. E-mail: xiet0106@foxmail.com

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: xiangli@usst.edu.cn; txli@mail.sitp.ac.cn

PACS:95. 85. Hp, 61. 82. Fk, 07. 57. Kp, 85. 60. Gz, 61. 72. Vv,

引言

红外探测器广泛应用于军事和民用的各个领域^[1-4]。根据其工作原理红外探测器可分为光热型和光子型两大类。其中,光热型探测器利用接收的红外光引起光敏材料的温度变化,并将温度变化转变成可测量的电信号,如热电堆探测器、辐射热计和热释电探测器^[5]。光热型探测器可以工作在室温下,但是由于灵敏度低且响应速度慢,大大限制了其应用。光子型探测器则是利用红外辐射激发束缚态电子来引起电信号的输出,包括光伏探测器、光导探测器等。相对于光热型探测器,光子型探测器的极限性能更高,且响应时间快。其中使用窄能隙半导体材料的光电探测器件具有灵敏度高、大面阵和可多色集成的优势,成为光子型红外探测的主要发展方向。大多数半导体红外探测器都需要工作在较低的温度下才能达到其理想性能,目前截止波长在2~3 μm 的短波红外探测器通常工作在220 K左右;响应波长大于3 μm 的中长波器件则需要100 K以下的制冷温度以实现高性能探测^[6],近年来针对3~5 μm 的中波红外探测,人们提出了HOT (High Operating Temperature)器件结构,可以将工作温度提升到150~180 K左右,仍然不能摆脱制冷系统的束缚;由此带来的高成本以及探测组件的大尺寸、高功耗和低实用性,极大地限制了它的广泛应用。真正打破光子型红外探测器大规模应用的限制,亟需解决的问题就是进一步提高其工作温度,实现近室温条件下的高灵敏红外探测。

限制红外光电探测器室温性能的因素主要是其自身的暗电流导致的电学噪声。如图1所示,随着温度上升HgCdTe和InSb器件的暗电流呈数量级的增长趋势^[7]。对于红外光子型探测器来说暗电流机制有扩散、产生复合、隧穿电流、表面漏电和欧姆电流等,其中在光伏型探测器中占主导并与温度具有强烈的相关性的暗电流是扩散电流和产生复合电流。扩散电流是指p-n结在反向偏置条件下少数载流子在其扩散长度内穿越空间电荷区形成的电流,其中扩散长度由少子的寿命和扩散系数决定。产生复合电流是空间电荷区(耗尽区)内载流子的激发和复合所产生的电流。在产生复合机制中通常对器件性能影响较大的是SRH(Shockley-Read-Hall)机制和俄歇机制,其中SRH机制由少数载流子

的SRH寿命以及缺陷能级密度决定,而俄歇机制则与背景载流子浓度正相关。对于光导型探测器来说,以量子阱探测器为例,其与温度相关的暗电流主要是由量子阱中基态电子的热发射速率所决定的^[8]。随着温度升高,更多位于基态的电子通过热激发跃迁成为自由电子,这会使得器件内的暗电流指数增加。

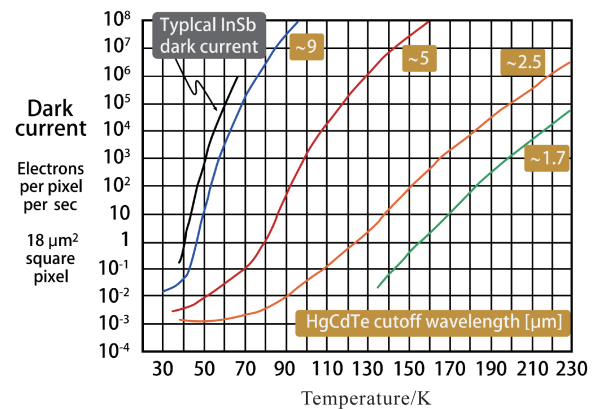


图1 MBE生长的HgCdTe材料探测器的暗电流,像元大小为18 μm 。典型的InSb暗电流特性作为对比^[7]

Fig. 1 The dark current of MBE grown HgCdTe detector material is shown for an 18- μm pixel. Typical InSb dark current is also shown as a comparison^[7]

从材料角度来看,由化合物半导体构成的窄能隙材料是主要的红外波段的探测材料。HgCdTe是目前在高性能红外探测器中使用最广泛的材料,通过组分的调节,HgCdTe能够覆盖从短波到甚长波的红外波段。同时,HgCdTe的少数载流子寿命相比同波段的III-V族材料长得多,因此在高工作温度下的暗电流抑制方面有显著优势^[8]。HgCdTe材料的缺点在于脆性大,外延生长难度大,缺陷密度大,成本高等。此外,HgCdTe中的俄歇机制导致的暗电流是限制器件性能的主要因素之一,其大小与掺杂浓度或多数载流子浓度呈指数相关^[9],这是降低HgCdTe探测器暗电流并提高工作温度亟需解决的问题。相比而言,III-V半导体材料具有更强的化学键,且材料生长的均匀性较好,缺陷少,成本低,适合于大面积制备。在短波红外InGaAs材料已经成为一种主流的探测材料;在中长波波段的III-V半导体材料,这里以InAs/GaSb二类超晶格(Type-II Superlattice, T2SL)材料为例,其由于SRH机制影

响,少数载流子寿命随着温度升高下降,导致扩散电流和产生复合电流都上升,严重降低器件性能,器件的量子效率也因此降低。因此,如何在保证载流子收集的情况下抑制暗电流是 III-V 半导体材料走向室温应用面临的问题。

本文介绍近年来半导体室温红外光电探测的研究进展,在整理出文献报道的近红外到长波红外探测器件室温下最佳水平的基础上,重点分析各波段的室温暗电流机制。并针对不同材料体系,从关键电子学参数的优化、器件结构的设计和亚波长光学结构的增强耦合等方面讨论进一步提升红外光电探测高温工作性能的方案。

1 InGaAs 近红外探测器

在 0.9~1.7 μm 的近红外波段,晶格匹配的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ 由于材料体系和器件工艺较为成熟,已经大规模应用于室温探测。表 1 总结了各国商用化的 InGaAs 近红外焦平面阵列探测器的性能报道,室温暗电流的最好水平已达 0.7 nA/cm^2 。

Ping Yuan 等人总结了 InGaAs/InP 平面型探测器的暗电流机制随温度的变化特性,如图 2 所示,当温度高于 283K 时,扩散电流被认为是室温下器件的主导暗电流机制。同时也可以观察到,在扩散电流主导的情况下,暗电流仍然有降低的余地。在进一步的分析中引入经典的 p+n 结构的扩散电流公式^[18-19]:

$$I_{df} = I_s \exp\left(\frac{qV}{kT} - 1\right) \quad , \quad (1)$$

$$I_s = \frac{qAn_i^2 D_p}{N_d L_p} \quad , \quad (2)$$

表 1 InGaAs 近红外探测器室温性能最新报道

Table 1 latest reports on room temperature performance of InGaAs near infrared detectors.

国家	制造商	年份	面阵规模/中心距 (μm)	截止波长	暗电流 (偏压=-0.1V)	其他性能指标
USA	Aerius	2009 ^[10]	1280×1024, 10	~1.67 μm	0.5 nA/cm^2 @280K	量子效率=80%
		2011 ^[11]	640×512, 25	~1.6 μm	1.5 nA/cm^2 @293K	量子效率>70%
	Teledyne/ Judson	2012 ^[12]	1280×1024, 12.5	~1.7 μm	2 nA/cm^2 @298K	
		2014 ^[13]	1280×1024, 12.5	~1.7 μm	0.7 nA/cm^2 @298K	量子效率>80%
France	Sofradir	2012 ^[14]	640×512, 15	~1.7 μm	7.5 nA/cm^2 @295K	
		2015 ^[15]	640×512, 15	~1.7 μm	5.5 nA/cm^2 @RT*	
Israel	SCD	2016 ^[16]	1280×1024, 10	~1.7 μm	0.5 nA/cm^2 @280K	量子效率>80%@1.55 μm
China	SITP, CAS	2016 ^[17]	640×512, 25	~1.7 μm	~5 nA/cm^2	量子效率=90%@1.55 μm 探测率>2×10 ¹² $\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}@RT^*$

*=Room temperature

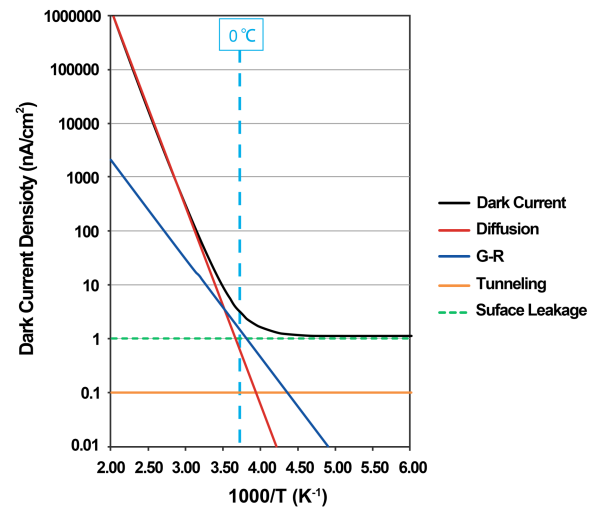


图 2 四种不同的暗电流机制随温度变化的特性^[13]

Fig 2 The temperature dependence of the four dark current sources and their combination^[13]

$$L_p = (D_p * \tau_p)^{1/2} \quad , \quad (3)$$

其中 D_p 为扩散系数, N_d 为 n 区掺杂浓度, L_p 为少数载流子空穴的扩散长度, τ_p 为少数载流子寿命。由公式(3)可知少数载流子的扩散长度与少子寿命 τ_p 呈正相关。因此降低扩散电流的方法有两条,一是提高少数载流子寿命,二是在不显著降低扩散长度的前提下,提高吸收区的掺杂浓度。

2 短波红外探测器(2~3 μm)

在 2~3 μm 这一波段,目前的红外探测器大多数还工作在 220 K 左右的温度下。以下将主要介绍 InGaAs 和 HgCdTe 这两种最常见的探测材料,根据已调研到的暗电流数据来对这两种器件的特性进行分析。

2.1 InGaAs 延伸波长探测器

表 2 收集了世界上几家主要的 InGaAs 延伸波长探测器生产商的室温性能资料。目前 InGaAs 延伸波长探测器的室温暗电流密度已达 mA/cm² 量级; 约 200 K 时暗电流水平在 μA/cm² 量级。随着 In 组分的增高(至 0.9 时已经可以完全覆盖整个 2~3 μm 波段), InGaAs 吸收层与 InP 衬底的晶格失配会变大, 通常会引入 InAlAs 作为缓冲层或电极层来改善晶格失配。李雪等人分析了 In_{0.83}Ga_{0.17}As/In_{0.83}Al_{0.17}As p-i-n 探测器的暗电流成份, 主要有扩散电流、产生复合电流、欧姆电流、表面漏电流。暗电流与偏置电压和温度之间的关系如图 3 所示。在从室温到 220K 的温度范围内, 图线的斜率不变, 此时计算得到的激活能 E_a~E_g, 这表明扩散电流是暗电流的主要成分。而在低于 220K 的温度范围内, 情况要复杂一些。在较低反向偏置电压下(如 -0.01V), 激活能 E_a~E_g/2, 此时暗电流由产生复合电流和欧姆电流主导; 而在较高反向偏置电压下(如 -0.5V), 激活能 E_a~E_g/4, 此时暗电流的主要成分是表面漏电流。

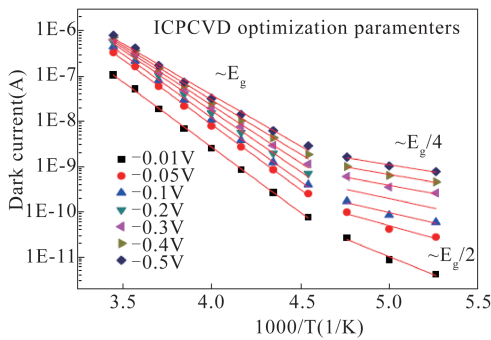


图 3 InGaAs 延伸波长探测器不同偏压下暗电流与温度的关系^[23]

Fig. 3 Temperature dependence of the dark current of InGaAs extended wavelength photodetector^[23]

表 2 InGaAs 延伸波长探测器室温性能最新报道

Table 2 latest reports on room temperature performance of InGaAs extended wavelength infrared detectors.

国家	制造商	年份	面阵规模/中心距(μm)	截止波长	暗电流 (偏压=-0.1V)	其他性能指标
USA	UTC Aerospace Systems	2016 ^[20]	320×256, 12.5	~2.5 μm	0.29 mA/cm ² @293K	零偏电阻 (R ₀)=83.2 Ω/cm ² @293K 峰值量子效率=60%@1.7 μm 峰值响应率=1.20 A/W 峰值探测率=4.7×10 ¹⁰ cm·Hz ^{1/2} /W
	Teledyne/Judson	2019 ^[21]	640×512	~2.6 μm	0.5 mA/cm ² @295K	峰值探测率=2.5×10 ¹⁰ cm·Hz ^{1/2} /W@300K
Turkey	Middle East Technical University	2014 ^[22]	640×512, 20	~2.65 μm	7.5 mA/cm ² @300K	探测率>5×10 ¹¹ cm·Hz ^{1/2} /W@200K
China	SITP, CAS	2017 ^[23]	512×256, 30	~2.55 μm	2.2 mA/cm ² @296K	峰值量子效率>80%

对于 InGaAs 延伸波长探测器来说, 其室温下的主要暗电流机制还是扩散电流; 但是在 200 K 左右, 除了扩散电流和表面电流影响以外, 还有欧姆电流的贡献。其来源于材料中的位错造成的类似金属分流器的分流效应^[25], 这与材料本身的缺陷以及界面间的晶格失配有关。

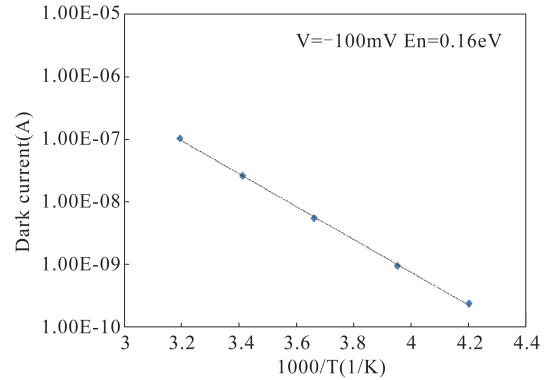


图 4 延伸波长 InGaAs 探测器在 -100 mV 偏压下 10×10 阵列测得的暗电流与温度关系图^[20]

Fig. 4 Extended wavelength InGaAs detectors: Arrhenius plot of the dark current VS temperature for the 10×10 test array at a reverse bias of -100 mV^[20]

图 4 是 P Mushini 等人在 2016 年对延伸波长 InGaAs 探测器暗电流的分析结果, 其室温下的暗电流低至 0.29 mA/cm², 是目前报道的最好结果。在偏压为 -0.1 V 条件下, 可以看到在 238 K 直到 313 K 的温度范围内, 其暗电流与 1000/T 的线性关系证明此时是单一机制下的暗电流。通过计算得到的激活能 E_a(0.16 eV)~1/3E_g(0.49 eV), 这表明在室温下扩散电流并不占主导地位。根据公式(2), 推测他们在控制延伸波长 InGaAs 材料的缺陷, 提高少数载流子的扩散长度方面已经做出了较好的改进。

2.2 HgCdTe 短波红外探测器

目前在短波红外应用的 HgCdTe 材料主要分为

表 3 HgCdTe 短波红外探测器室温性能的最新报道

Table 3 latest reports on room temperature performance of HgCdTe extended wavelength infrared detectors.

国家	制造商	年份	面阵规模/ 中心距 (μm)	材料	截止波长	暗电流(bias=-0.1V)	其他性能指标
USA	EPIR	2014 ^[26]	320×256, 30	HgCdTe/Si	~2.65 μm	~20mA/cm ² @296K	量子效率>70%
		2016 ^[27]	640×512, 10	HgCdTe/ CdTe/Si	~2.59 μm	~7mA/cm ² @296K	
	Teledyne/Judson	2016 ^[28]	4096×4096	HgCdTe/CdZnTe	~2.45 μm	0.0055e ⁻ @-0.25V, 80K	峰值量子效率>90%@1.5 μm
		2018 ^[29]	320×256, 30	HgCdTe/CdZnTe	~2.5 μm ~2.9 μm	27 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ @296K* 37 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ @296K*	峰值量子效率=85%
France	Sofradir	2012 ^[30]	384×288, 15	HgCdTe/CdZnTe	~2.45 μm	0.5mA/cm ² @300K*	

*原文没有提供偏压数据

Si 基和 CdZnTe 基。以下着重分析这两种器件的室温暗电流特性。CdZnTe (Zn = 3%) 衬底是 HgCdTe 外延材料的最优选择, 其与 HgCdTe 合金的晶格失配很小, 因此器件暗电流低, 性能优于 Si 基 HgCdTe 探测器。然而, CdZnTe 衬底生产成本高, 且无法大面积生长, 而 Si 衬底则在读出电路工艺、大规模生产和降低成本方面有一定的优势。美国 EPIR 公司的 R Bommena 等人^[26]研究了 Si 基 HgCdTe 探测器, 通过对比实验测得的暗电流数据和模拟得到的不同机制暗电流随温度变化的趋势如图 5 所示, 在 295K 条件下, 短波红外 HgCdTe 探测器的暗电流包括扩散电流, 产生复合电流, 欧姆电流以及陷阱辅助和带间隧穿电流。在偏置电压为 -0.05 V 时, 扩散电流是最主要的暗电流机制; 在偏置电压达到 -0.5 V 时, 可以看到欧姆电流随着偏压增大显著上升, 对暗电流的贡献与扩散电流相当。这种情况是由于 HgCdTe 材料与 Si 材料之间的晶格失配产生位错等缺陷, 导致分流效应从而产生了欧姆电流, 并且随着偏压增大其影响越大。在 2016 年, H Park 等人通过材料工艺的改进, 在 HgCdTe/Si 材料中使用 CdTe 缓冲层来改善晶格失配, 并成功将暗电流降低至 7mA/cm²@296K^[27]。

由于 HgCdTe 在 CdZnTe 上生长的位错密度仅有 10⁴ cm⁻², 在器件暗电流抑制方面具有很大的优势^[31]。2018 年美国的 Teledyne/Judson 公司所研制的 HgCdTe/CdZnTe 探测器的截止波长为 2.5 μm 和 2.9 μm , 在室温下测得的暗电流分别为 27 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 和 37 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, 是目前已报道的最佳水平。并且如图 6 所示, 温度大于 -30 摄氏度时, 暗电流水平已经略

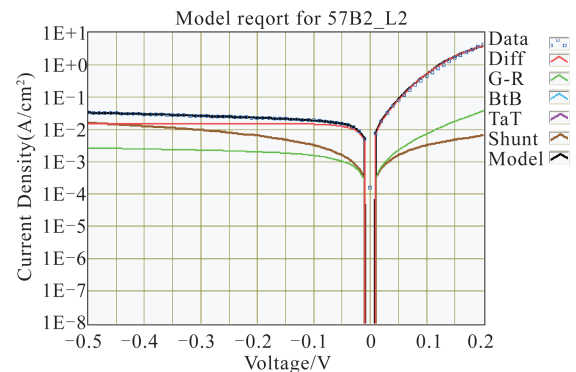


图 5 HgCdTe/Si 短波红外光电二极管在 295K 下的暗电流成分分析^[26]

Fig. 5 Modeled dark current components for SWIR HgCdTe/Si diode at 295 K^[26]

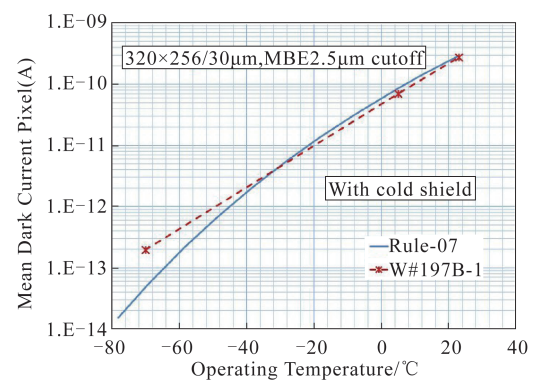


图 6 HgCdTe/CdZnTe 探测器的像元平均暗电流 (使用冷屏) 与温度的关系, 其中虚线为 Rule-07 的理论值^[30]

Fig. 6 Average pixel dark current (with cold shield) vs temperature for 2.5 μm cutoff HgCdTe/CdZnTe photodetector, comparison with Rule-07^[30]

低于 Rule-07 的理论预估值。

2.3 本章小结

从上述表格的整理结果来看,在 2~3 μm 波段 InGaAs 延伸波长探测器的探测率已经可以达到 $10^{10} \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 数量级,高出红外热探测器一个量级以上,可以应用于室温探测。HgCdTe 短波红外器件的暗电流低于 InGaAs 延伸波长探测器一个数量级。其原因一方面在于 HgCdTe 材料的少数载流子寿命高于 InGaAs 材料一个数量级以上,扩散电流更小。另一方面还因为 HgCdTe 材料的 SRH 寿命 (~23 μs ^[32]) 比 InGaAs 材料长 (<1 μs ^[33]),这一主要体现在晶格失配很小的 CdZnTe 基的 HgCdTe 材料上。相比之下, Si 基 HgCdTe 材料在大面积生长和硅读出电路的兼容性方面的优势,适合制造大面阵低成本的 HgCdTe 焦平面探测器。

3 中波红外探测器

在中波波段 (3~5 μm), 由于带隙进一步变小, 传统的高灵敏 InSb 和 HgCdTe 器件通常工作在 100

K 以下的温度, 需要制冷机才能实现。提高中波红外 (MWIR) 探测器的工作温度是提供低成本、小型化和低功耗探测器系统的必要途径^[34-35]。国际上已经发表了很多商用化的 HOT (High Operating Temperature) 器件的工作 (如表 4 所示), 其工作温度已经提升到 150~180 K。若将探测器工作温度提升到 220 K 以上, 可以用体积更小、成本更低的热电制冷器来替代传统的制冷机。进一步地, 如果能实现 MWIR 探测器室温工作, 则可以摆脱制冷约束, 并拓展 MWIR 探测器在一些新的领域如安防和危险预警等方面的应用。

表 4 总结了世界各国的机构在中波红外探测器方面的一些最新报道。目前中波 HOT 器件包括铟化物 nBn 探测器, HgCdTe 探测器以及基于二类超晶格材料的带间级联探测器 (Interband Cascade Infrared Photodetectors, 以下简称 ICIP)。下面将针对这几类探测器进行对比和介绍。

nBn 结构主要是通过引入势垒层消除了耗尽区

表 4 中波红外探测器近室温性能的最新报道

Table 4 latest reports on near room temperature performance of mid-wavelength infrared detectors.

国家	制造商/机构	年份	材料	截止波长	暗电流	其他性能指标
USA	J P Lab	2016 ^[36]	InAsSb/InSb T2SL nBn	~4.6 μm	5 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ @150K, -0.1V 0.1 A/cm^2 @250K	量子效率=45% 峰值探测率= $8 \times 10^9 \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ @250K 峰值探测率= $2.75 \times 10^{10} \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ @250K
		2018 ^[37]	InAsSb/InSb T2SL nBn	~4.5 μm	1 A/cm^2 @290K, -0.1V	
	NWU	2018 ^[38]	InAs/InAsSb T2SL	~5.37 μm @150 K	96 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ @157K, -0.2V 50 mA/cm^2 @222K	量子效率=52%@4.5 μm 噪声等效温差=18.7mK@160K
		2019 ^[39]	InAs/InAsSb T2SL nBn	~4.5 μm	2 A/cm^2 @300K, -0.1V	峰值响应率=0.65A/W@1.9 μm , 300K,
	NVESD	2012 ^[40]	HgCdTe/CdTe/GaAs	~4.2 μm @150 K	10 mA/cm^2 @300K, -50mV	
	Univ. Oklah.	2012 ^[41]	InAs/GaSb T2SL ICIP	~4.7 μm @300 K	2.7 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ @150K, -0.05V, 28 mA/cm^2 @300K, -0.05V	探测率= $2 \times 10^9 \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ @300K $R_0A=1.87 \Omega \cdot \text{cm}^2$ @300K
France	Sofradir	2015 ^[42]	InSb/InAlSb nBn	~5.4 μm	1 A/cm^2 @120K, -0.05V	
		2016 ^[43]	HgCdTe/CdZnTe	~4.2 μm	30 mA/cm^2 @295K, -0.1V	
Israel	SCD	2019 ^[44]	XBn-InAsSb	~4.2 μm	0.7 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ @150K, -0.1V	
Poland	MUT	2014 ^[45]	HgCdTe p ⁺ B-p-n-N ⁺	~3.6 μm @300 K	0.15 mA/cm^2 @230K 8 mA/cm^2 @290K, -0.1V	峰值响应率=2 A/W
		Inst. of Semi, CAS	2017 ^[46]	InAs/GaSb T2SL	~4.8 μm	0.08 mA/cm^2 @140K, -0.1V 8 A/cm^2 @300K, -0.1V
China	SITP, CAS	2016 ^[47]	InAs/GaSb T2SL ICIP	~4.8 μm		量子效率=19.8%@300K $R_0A=0.06 \Omega \cdot \text{cm}^2$ @300K
		2019 ^[48]	InAs/GaSb T2SL ICIP	~5.3 μm	0.3 mA/cm^2 @148K, -0.1V 3.97 A/cm^2 @304K, -0.1V	峰值响应率=1.2A/W@4.3 μm , 146K

*原文未给出偏压条件

来抑制暗电流的方法以提高器件工作温度。这种结构已经在 III-V 材料的 HOT 器件中得到广泛的应用。Wu D 等人于 2019 年测得在 InAs/InAsSb 超晶格 nBn 探测器 300K 下的暗电流为 $2 \text{ A/cm}^2 @ -0.1 \text{ V}$ 。如图 7 的右图所示,在温度大于 200K 时,数据拟合的活化能 $E_a = 0.297 \text{ eV}$,并且非常接近所设计的导带偏移值 $\Delta E_c = 0.294 \text{ eV}$ 。这证明了其扩散电流主导的暗电流特性。

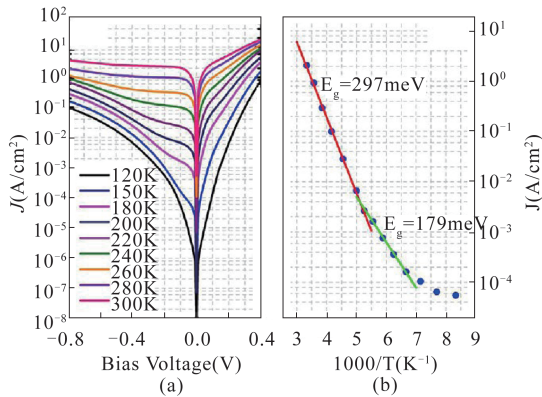


图 7 中波 InAs/InAsSb nBn 探测器暗电流: (a) $T=120\sim 300 \text{ K}$ 范围内暗电流与偏压的关系; (b) -0.1 V 偏压下暗电流与温度的关系^[41]

Fig. 7 Dark current characteristics of MWIR InAs/InAsSb nBn detector: (a) Measured dark current density VS applied bias in the temperature range $T=120\sim 300 \text{ K}$ as indicated. (b) The Arrhenius plot of dark current density VS inverse photodiode temperature measured at applied bias $V=-0.1 \text{ V}$ ^[41]

HgCdTe 仍然是中波红外的重要探测材料之一,目前在中波红外主要应用的是晶格失配较小的 GaAs 基和 CdZnTe 基的 HgCdTe 材料。美国 NVESD 的 Joseph G 等人 2012 年在 HgCdTe/CdTe/GaAs 材料 (截止波长为 $4.2 \mu\text{m}$) 的探测结构中测得了室温下暗电流为 10 mA/cm^2 (偏压条件为 -50 mV)。图 8 是沉积在砷化镓衬底 HgCdTe/CdTe/GaAs 上的 MWIR HgCdTe 器件的暗电流随温度变化的曲线图。CdTe 用作 HgCdTe 和 GaAs 衬底之间的缓冲层。其暗电流与温度关系显示,在室温下扩散电流为主要成分;在低于 130 K 的温度下则产生复合电流的影响更大。

对比以上两类器件可以看出在室温下, HgCdTe 相比于 Sb 化物 III-V 材料有暗电流低的优势。主要原因是中波 HgCdTe 材料具有较长的少数载流子寿命 (通常在 $2\sim 60 \mu\text{s}$ ^[49]), 而 Sb 化物 III-V 族材料的 SRH 寿命相对较短, 160 K 下约为 $0.6 \mu\text{s}$, 高温下的

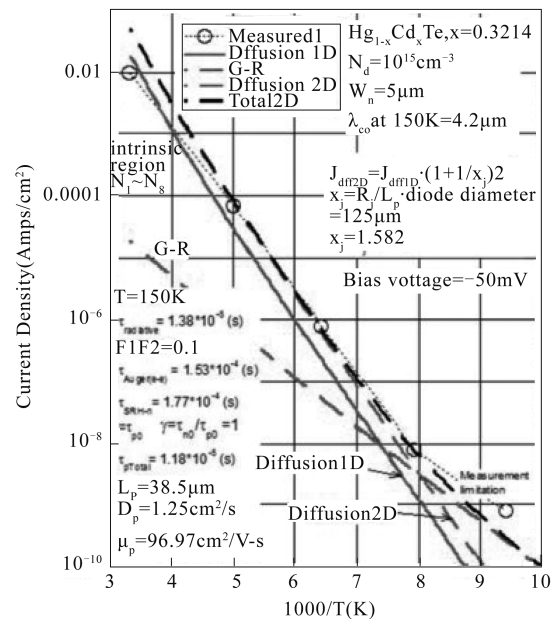


图 8 HgCdTe/CdTe/GaAs 材料体系中的暗电流与温度关系模拟值和实验值^[40]

Fig. 8 Measured and modeled current density versus inverse temperature of HgCdTe/CdTe/GaAs^[40]

寿命更短^[50]。

在进一步提升 III-V 族探测器的性能, 提高工作温度方面, 基于二类超晶格材料的带间级联探测器提供了更好的思路。由于 300 K 下中波二类超晶格材料的少数载流子扩散长度只有 $0.4 \mu\text{m}$ 左右^[47], 在带间级联探测器 (ICIP) 中, 如图 9 所示, 每个级联阶段的设计长度短于光子载流子的扩散长度。每个二类超晶格吸收区都位于电子势垒和空穴势垒中间, 由多个这样的级联结构串联组成了器件的吸收区。这种结构有以下两个优点, 第一通过多级串联的结构提高 R_0A , 减小器件暗电流。第二弥补二类超晶格材料在高温下光激发载流子扩散长度短缺点, 使器件在室温下保持较高的量子效率。在 2012 年 Z Tian 等人的报道中, InAs/GaSb 二类超晶格探测器的室温截止波长为 $4.7 \mu\text{m}$, 在 300 K 和偏压为 -0.05 V 条件下测得的暗电流为 28 mA/cm^2 , 低于 nBn 探测器约两个量级, 与目前中波 HgCdTe 探测器最好水平相当 ($10 \text{ mA/cm}^2 @ 295 \text{ K}, -0.1 \text{ V}$, 截止波长为 $4.2 \mu\text{m} @ 150 \text{ K}$)。

本章比较了 HgCdTe、nBn 势垒结构和 InAs/GaSb T2SL 带间级联结构这三种目前主流的中波红外探测器的室温性能。与 HgCdTe 相比, III-V 族材料的少数载流子扩散长度短, 在室温下这一劣势更加明显。但是在带间级联结构中, 如 InAs/GaSb

T2SL探测器已经通过短周期带间级联的方式,在室温下达到了与HgCdTe器件可比拟的暗电流水平,是中波HOT器件乃至未来室温器件有潜力的材料。

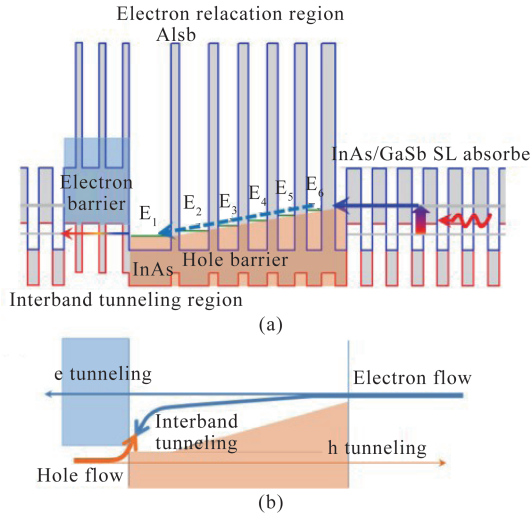


图9 InAs/GaSb二类超晶格带间级联探测器的光生载流子输运和暗电流示意图^[41]

Fig. 9 Schematic illustration of the InAs/GaSb T2SL interband cascade infrared photodetectors: (a) photocarrier dynamics, and (b) dark current dynamics in ICIPs^[41]

4 长波红外探测器

对于响应波长在8~12 μm大气窗口波段的长波红外探测器来说,其带隙已经减小到可以与热电子

激活能比拟的程度,热跃迁的概率非常大,因此进一步提升工作温度则面临着更大挑战。目前在长波红外已经有报道的HOT器件,如量子阱、量子点、HgCdTe和二类超晶格等探测器,工作温度还主要在100 K以下^[51]。表5则是针对200 K以上工作的长波红外探测器进行的调研,室温性能的工作是关注的重点。

表中已经有室温下性能数据的包括HgCdTe探测器、InAs/GaSb T2SL带间级联结构和量子级联探测器。S Velicu等人在2010年采用p⁺/v/n⁺结构,在反向偏置电压下将吸收区的载流子浓度降低到热平衡以下,抑制HgCdTe探测器中的俄歇机制以提高工作温度。如图10(a)和(b)所示,300 K下的暗电流大小为5 A/cm²,俄歇1机制得到了较好的抑制。尽管如此,仍然可以发现在俄歇电流得到抑制以后,从低温一直到300K时SRH机制都是暗电流的主导机制,并且在300 K时SRH暗电流已经与扩散电流的大小相当。波兰的A Rogalski等人指出,由于存在较多缺陷,长波HgCdTe材料中大量Hg元素的空位形成了SRH中心^[59],其缺陷能级为0.75E_g,使得SRH机制对暗电流的贡献变得更加明显。

2016年Lin L等人报道了的InAs/GaSb T2SL带间级联探测器,截止波长约为8 μm,其工作温度最高可以达到340 K,并且300 K下的探测率为1×10⁸ cm²·Hz^{1/2}/W,高于相同探测波长下的HgCdTe光伏探测器约两倍。如图11所示,300 K下8级的带

表5 长波红外探测器近室温性能最新报道

Table 5 latest reports on on near room temperature performance of long-wavelength infrared detectors.

国家	制造商/机构	年份	材料/器件结构	截止波长	暗电流/R ₀ A	其他性能指标
USA	EPIR	2010 ^[52]	HgCdTe	~10.4 μm@100 K	~5A/cm ²	
				~7.4 μm@250 K	@300K, -0.1V	
USA	Univ. Oklah.	2016 ^[53]	InAs/GaSb T2SL ICIP	~8 μm@300 K	~0.8Ω·cm ² @200K*,	探测率=1×10 ⁸ cm ² ·Hz ^{1/2} /W @300K
					~0.0082Ω·cm ² @300K*	
Poland	MUT	2018 ^[54]	InAs/InAsSb T2SL	~9.8 μm@210 K		探测率=2×10 ¹⁰ cm ² ·Hz ^{1/2} /W @210K
				~10.4μm@230 K		
		2016 ^[55]	HgCdTe barrier	~9μm@230K	~10A@230K, -0.1V	探测率=2×10 ⁹ cm ² ·Hz ^{1/2} /W @230K
		2019 ^[56]	HgCdTe	~9μm@300K		探测率>2×10 ⁸ cm ² ·Hz ^{1/2} /W @300K
Swiss	Univ. Neuch.	2009 ^[57]	GaAs/AlGaAs QCD	Peak wavelength @7.5μm and @10μm		探测率=1×10 ⁷ cm ² ·Hz ^{1/2} /W @300K, 7.5μm and 1×10 ⁷ cm ² ·Hz ^{1/2} /W@300K, 10μm
Austria	Vienna Univ. Tech	2014 ^[58]	InGaAs/InAlAs QCD	Peak wavelength @8μm		峰值响应率=16.9mA/W @8μm, 300K

*为8级级联结构测得的暗电流数值。

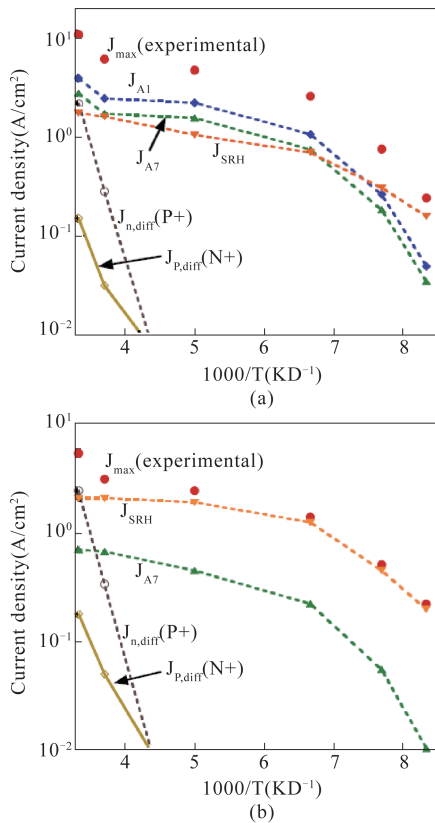


图 10 p⁺/v/n⁺ 结构 HgCdTe 长波红外探测器的暗电流机制与温度关系: (a) 俄歇抑制之前主要的暗电流机制: Auger-1, Auger-7, SRH, p⁺区的扩散电流, n⁺区的扩散电流 (b) 俄歇抑制之后主要的暗电流机制: SRH, Auger-7, p⁺区的扩散电流, n⁺区的扩散电流^[52]

Fig. 10 p⁺/v/n⁺ HgCdTe LWIR PV detector: (a) Experimental values for J_{max} versus temperature (b) Experimental values for J_{min} versus temperature^[52]

带间级联结构 R_0A 为 $0.0082 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 响应率约为 0.2 A/W 。并且在温度为 140 K 以上时, 其激活能 (149 meV) 几乎等于带隙 (165 meV), 证明多级结构器件的暗电流受扩散机制主导。同时, 采用 8 个周期的带间级联探测器, 尽管响应率仅为单级级联结构的四分之一, 但是其 R_0A 高出单级结构接近两个数量级, 因而具有更高的室温探测性能。

F R Giorgetta 等人在 2009 年报道的 GaAs/AlGaAs 子能级跃迁量子级联探测器 (QCD), 采用 30 个级联周期的设计提高器件的 R_0A , 如图 12 所示, 300 K 时峰值响应波长分别为 $7.5 \mu\text{m}$ 和 $10 \mu\text{m}$ 的探测率均为 $1 \times 10^7 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。2014 年维也纳科技大学的 Peter Reininger 等人提出了基于对角跃迁机制的量子级联探测器, 其 300 K 下的响应率为 16.9 mA/W 。如图 13 所示, 目前子带量子级联探测器的

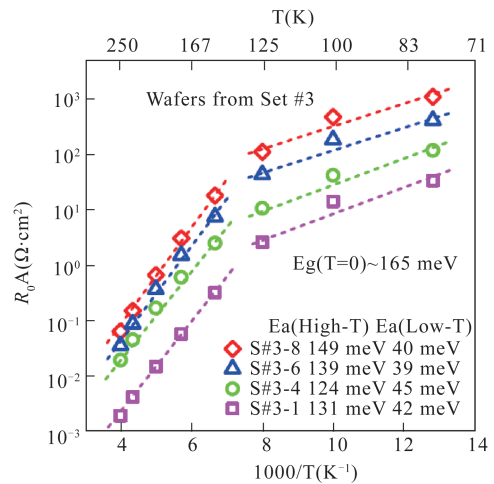


图 11 InAs/GaSb T2SL 长波红外带间级联探测器的 R_0A 与温度的关系^[53]

Fig. 11 Arrhenius plot of R_0A for InAs/GaSb T2SL ICIP devices from wafers in set #3^[53]

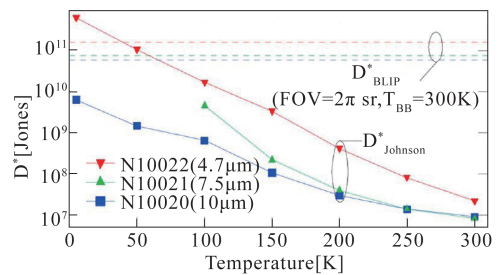


图 12 GaAs/AlGaAs 量子级联探测器, 探测中心波长分别为 $4.7 \mu\text{m}$, $7.5 \mu\text{m}$ 和 $10 \mu\text{m}$ 的探测率随温度变化关系^[57]

Fig. 12 GaAs/AlGaAs QCD: Detectivities of N1020, N1021, and N1022 as function of temperature. The dashed lines on top represent the background limited detectivity for a hemispherical FOV and a background temperature of 300 K ^[57]

室温暗电流还高于带间级联探测器一个数量级以上^[60], 原因在于多数载流子主导的热激发。此外子带级联结构的吸收效率低, 周期数远多于带间级联结构, 因此响应率极低。

通过以上对长波红外探测器性能参数的整理以及暗电流机制的分析, 可以看到目前在这一波段 InAs/GaSb T2SL 带间级联探测器和 HgCdTe 探测器都达到了比较好的水平。InAs/GaSb T2SL 带间级联探测器近些年在能带设计方面的改进, 如多级短周期级联结构的设计可以兼顾暗电流的抑制和室温响应率的保持, 室温下长波器件的零偏电阻高于 HgCdTe 探测器约两个数量级^[61-63]。相对 III-V 族材料, HgCdTe 材料在长波红外依然有少数载流子寿命长的优势 (77 K 下为 $2\sim 20 \mu\text{s}$ ^[64]), 但是目前面临的

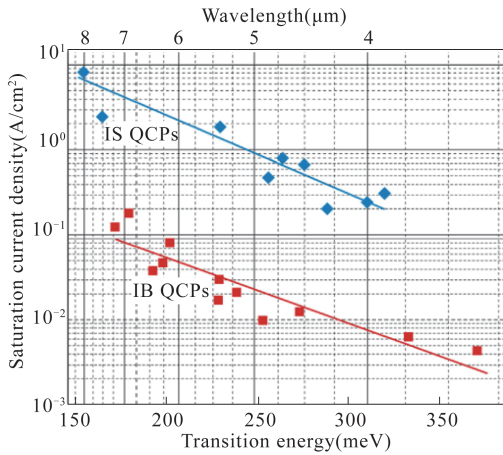


图 13 子带间量子级联探测器和带间级联探测器室温下的饱和电流^[62]

Fig. 13 Saturation current density for IS (intersubband) and IB (interband) quantum cascade devices at room temperature^[62]

问题是材料中较多的天然缺陷、残留杂质和位错引发的SRH机制在近室温下已经成为暗电流的主要机制。目前材料的发展方向主要是降低吸收区的掺杂水平和减少引起SRH复合的缺陷。

5 国内进展

近年来,国内的多家单位包括中国科学院上海技术物理研究所、半导体研究所、重庆光电技术研究所和昆明物理研究所等也开展了高工作温度(HOT)器件以及室温半导体红外探测器件的研究。其中,中科院半导体研究所牛智川小组2019年报道的320×256元InAs/GaSb二类超晶格HOT探测器,在300 K下截止波长达到4.8 μm,暗电流为8 A/cm²。中科院上海技术物理研究所除了前文介绍的2-3 μm波段的InGaAs/InAlAs探测器外,在近红外方面,李雪等人也已经研制了640×512元等一系列InGaAs/InP焦平面阵列探测器,如图14(a)所示,在300 K下的暗电流约为5 nA/cm²,探测率已达2×10¹² cm·Hz^{1/2}/W以上,与国际水平相当。在中红外波段,陈建新小组在2016年报道的InAs/GaSb二类超晶格带间级联探测器,如图15(b)所示,300 K下截止波长为4.8 μm,探测率达到1.23×10⁹ cm·Hz^{1/2}/W,已接近目前报道的最好水平;零偏电阻R₀A与温度的关系显示高于120K时主导的暗电流机制为扩散电流。2019年陈建新小组进一步报道了截止波长为5.3 μm的带间级联探测器,室温暗电流低至3.97 A/cm²。

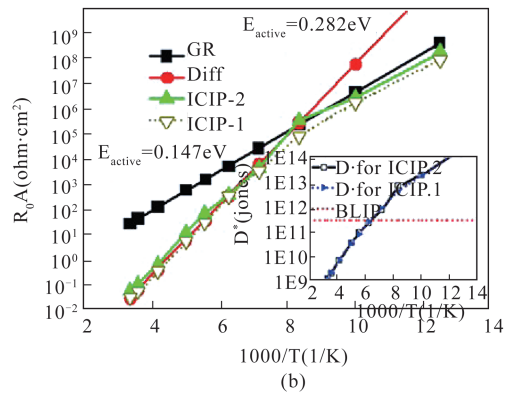
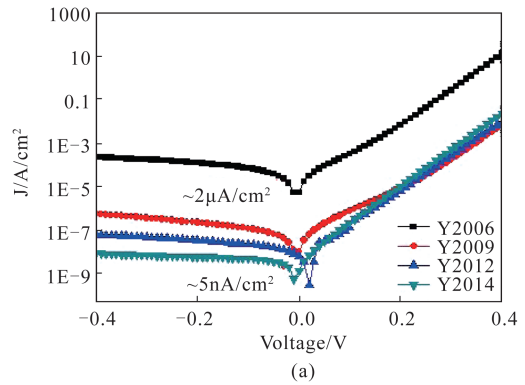


图 14 中国科学院上海技术物理研究所在近红外和中波红外的最新进展:(a) 近红外InGaAs焦平面阵列探测器暗电流密度^[17] (b) 实验测得InAs/GaSb二类超晶格单级级联结构(ICIP-1)和二级级联结构(ICIP-2)的零偏电阻(R₀A)与探测率(D*)随温度变化关系以及激活能和暗电流机制^[47]

Fig. 15 Recent progress of the SITP(CAS) in near-and mid-wavelength infrared: (a) Dark current development of Near-IR InGaAs FPAs^[17] (b) Measured R₀A and D* for the one- (ICIP-1) and two-stage (ICIP-2) interband cascade photo detectors at a wide range of temperature. Also shown the E_a and dark current mechanisms^[47]

6 结论

针对光子型红外探测器室温工作的前景,比较分析了不同波段的半导体材料以及器件结构的室温探测性能和暗电流机制。在近红外波段,晶格匹配的InGaAs/InP探测器的室温暗电流可以低至nA/cm²,而在2-3μm的短波红外波段,HgCdTe和InGaAs/InAlAs探测器的暗电流均在百μA/cm²左右,后者的室温探测率已达到10¹⁰cm·Hz^{1/2}/W。中波红外波段,二类超晶格和nBn结构的III-V族半导体探测器的室温暗电流通常高达1A/cm²左右,而CdZnTe基HgCdTe探测器的暗电流则大约在几十mA/cm²。到了长波红外,HgCdTe探测器的暗电流将达到A/cm²量级。因此中长波红外器件在室温下

性噪比急剧恶化,其灵敏度难以满足室温高性能探测,亟需解决的就是暗电流的抑制。基于InAs/GaSb二类超晶格材料的带间级联探测器利用多级光伏效应的结构有效地抑制了器件暗电流,提高了器件的 R_0A ,保证了室温下较好的信噪比。对于长波红外HgCdTe探测器,通过 $p^+i/v/n^+$ 的结构设计结合非平衡的工作条件以及降低吸收区载流子浓度的方式可以降低俄歇机制的影响,但同时还面临着材料缺陷导致的近室温下的SRH机制的影响。这些电子学和材料学方面的诸多改进正在推动红外探测器走向更大规模的室温应用;同时,一些新颖的亚波长人工光学结构在增强光耦合以及降低暗电流方面提供了新的优化途径。这两者相结合的方式将成为未来红外探测器走向室温应用的重要方向。

References

- [1] Wang P, Xia H, Li Q, *et al.* Sensing Infrared Photons at Room Temperature: From Bulk Materials to Atomic Layers [J]. *Small*, 2019, **15**(46): 1904396.
- [2] Antoni R. History of infrared detectors [J]. *Opto-Electronics Review*, 2012, **20**(3): 279–308
- [3] Antoni R. Infrared detectors: status and trends [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2003, **27**(2–3): 59–210.
- [4] Chee L T, Hooman M. Emerging technologies for high performance infrared detectors [J]. *Nanophotonics*, 2018, **7**(1): 169–197,
- [5] Antoni R. Infrared detectors: an overview [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2002, **43**(3–5): 187–210.
- [6] Potrowski M, Antoni R. HOT infrared photodetectors [J]. *Opto-Electronics Review*, 2013, **21**(2): 239–257.
- [7] Thomas S, James W B. High Performance Focal Plane Arrays for Space Applications [J]. *Optics and Photonics News*, 2008, **19**(6): 22–27.
- [8] Pitrowski M, Antoni R. Performance comparison of barrier detectors and HgCdTe photodiodes [J]. *Optical Engineering*, 2014, **53**(10): 106105.
- [9] William E T. 'Rule 07' Revisited: Still a Good Heuristic Predictor of p/n HgCdTe Photodiode Performance [J]. *Journal of Electronic Material*, 2008, **39**(7): 1030–1035.
- [10] Machael M, Jon G, Chad W, *et al.* Low dark current InGaAs detector arrays for night vision and astronomy [C]// Proc. of SPIE, 2009, 7298: 72983F.
- [11] Machael M, Andrew H, Jon G, *et al.* InGaAs focal plane arrays for low light level SWIR imaging [C]// Proc. of SPIE, 2011, 8012: 801221.
- [12] Yuan H, Mike M, Zhang J, *et al.* Low dark current small pixel large format InGaAs 2D photodetector array development at Teledyne Judson Technologies [C]// Proc. of SPIE, 2012, **8353**: 91–98.
- [13] Yuan Ping, James Chang, Joseph C. Boisvert, *et al.* Low-dark current 1024×1280 InGaAs PIN arrays [C]// Proc. of SPIE, 2014, **9070**: 71–76.
- [14] Eric D B, Fabrice G, Pierre C, *et al.* High-performance 640×512 pixel hybrid InGaAs image sensor for night vision [C]// Proc. of SPIE, 2012, **8353**: 835307.
- [15] Rouvié A, Coussement J, Huet O, *et al.* InGaAs focal plane array developments and perspectives [C]// Proc. of SPIE, 2015, 9451: 945105.
- [16] Fraenkel R, Berkowicz E, Bykov L, *et al.* High Definition 10 μ m pitch InGaAs detector with Asynchronous Laser Pulse Detection mode [C]// Proc. of SPIE, 2016, 9819: 981903.
- [17] Shao X M, Gong H M, Li X, *et al.* Developments of High Performance Short-wave Infrared InGaAs Focal Plane Detectors [J]. *Infrared Technology* (邵秀梅, 龚海梅, 李雪, 等. 高性能短波红外InGaAs焦平面探测器研究进展. 红外技术), 2016, **38**(8): 629–635.
- [18] Zemel A, Gallant M. Current-voltage characteristics of metalorganic chemical vapor deposition InP/InGaAs p-i-n photodiodes: The influence of finite dimensions and heterointerfaces [J]. *Journal of Applied Physics*, 1988, **64**(11): 6552–6561.
- [19] Forrest S R. Performance of In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP photodiodes with dark current limited by diffusion generation recombination and tunneling [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1981, **17**(2): 217–226.
- [20] Mushini P, Huang Wei, Manuel Morales, *et al.* 2D SWIR image sensor with extended wavelength cutoff of 2.5 μ m on InP/InGaAs epitaxial wafers with graded buffer layers [C]// Proc. of SPIE, 2016, **9819**: 98190D–1
- [21] <http://www.judsontechnologies.com/>
- [22] Arslan Y, Oguz F, Besikci C. Extended Short Wavelength Infrared In_{0.83}Ga_{0.17}As Focal Plane Array [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2014, **50**(12): 957
- [23] Li X, Gong H M, Fang J X, *et al.* The development of InGaAs short wavelength infrared focal plane arrays with high performance [J]. *Infrared Phys. Technol*, 2017, **80**: 112–119.
- [24] Martin H E, Hai Nguyen, Martin C R, *et al.* High resolution 1.3 megapixel extended wavelength InGaAs [C]// Proc. of SPIE, 2018, 9451: 945105.
- [25] Johnson S M, Rhiger D R, Rosebeck J P, *et al.* Effect of dislocations on the electrical and optical properties of long-wavelength infrared HgCdTe photovoltaic detectors [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 1992, **10**(4): 1499–1507.
- [26] Bommenna R, Bergeson J, Kodama D, *et al.* High-performance SWIR HgCdTe FPA development on silicon substrates [C]// Proc. of SPIE, 2014, 9070: 907009.
- [27] Park H, Hansel D, Mukhortova A, *et al.* Extended Short Wavelength Infrared HgCdTe Detectors on Silicon Substrates [C]// Proc. of SPIE, 2016, 9974: 99740H–1.
- [28] Zandian M, Farris M, McLevige W, *et al.* Performance of science grade HgCdTe H4RG–15 image sensors [C]// Proc. of SPIE, 2016, 9915: 99150F.
- [29] Yuan H, Zhang Jiawen, Kim Jongwoo, *et al.* High performance SWIR HgCdTe 320×256/30 μ m FPAs at Teledyne Judson Technologies [C]// Proc. of SPIE, 2018, 10766: 107660J–1.
- [30] Gravrand O, Mollard L, Boulade O, *et al.* Ultra low dark current CdHgTe FPAs in the SWIR range at CEA and Sofradir [C]// Proc. of SPIE, 2012, 8353: 83530C.
- [31] Priyalal S W. Dislocation reduction in HgCdTe grown on CdTe/Si [C]// Proc. of SPIE, 2016, 9854: 98540B.

- [32] Schuster J, DeWames R E, DeCuir E A, *et al.* Heterojunction Depth in p⁺-on-n eSWIR HgCdTe Infrared Detectors: Generation-Recombination Suppression [C]// Proc. of SPIE, 2015, 9609: 960904.
- [33] Wang X D, Hu W D, Chen X S, *et al.* Dark current simulation of InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP p-i-n photodiode [J]. *Optical Quantum Electronics*, 2008, **40**(14-15): 1261-1266.
- [34] Schaake H F, Kinch M A, Chandra D, *et al.* High-Operating-Temperature MWIR Detector Diodes [J]. *J. Electron. Mater.*, 2008, **37**(9): 1401-1405.
- [35] Nguyen B M, Cao Y, Adam J W, *et al.* HOT MWIR detectors on Silicon substrates [C]// Proc. of SPIE, 2018, 10624: 106240Z.
- [36] Alexander S, David Z T, Cory J H, *et al.* Mid-wavelength infrared InAsSb/InSb nBn detector with extended cut-off wavelength [J]. *Appl. Phys. Lett*, 2016, **109**(10).
- [37] Alexander S, Sam A K, Anita F, *et al.* High operating temperature nBn detector with monolithically integrated microlens [J]. *Appl. Phys. Lett*, 2018, **112**(4): 041105.
- [38] David T, Alexander S, Arezou K, *et al.* Mid-wavelength high operating temperature barrier infrared detector and focal plane array [J]. *Appl. Phys. Lett*, 2018, **113**(2): 021101.
- [39] Wu D, Dehzangi A, Razeghi M. Demonstration of mid-wavelength infrared nBn photodetectors based on type-II InAs/InAs_{1-x}Sb_x superlattice grown by metalorganic chemical vapor deposition [J]. *Appl. Phys. Lett*, 2019, **115**(6): 0061102.
- [40] Joseph G P, Roger D, Philip P, *et al.* HOT MWIR HgCdTe performance on CZT and alternative substrates [C]// Proc. of SPIE, 2012, 8353: 83532X.
- [41] Tian Z, Hinkey R T, Yang R Q, *et al.* Interband cascade infrared photodetectors with enhanced electron barriers and p-type superlattice absorbers [J]. *J. Appl. Phys*, 2012, **111**(2): 024510.
- [42] Perez J P, Evirgen A, Abautret J, *et al.* MWIR InSb detector with nBn architecture for high operating temperature [C]// Proc. of SPIE, 2015, 9370: 93700N-1.
- [43] Kerlain A, Brunner A, Samgiao D, *et al.* Mid-Wave HgCdTe FPA Based on P-on-N Technology: HOT Recent Developments. NETD: Dark Current and 1/f Noise Considerations [J]. *J. Electron. Mater*, 2016, **45**(9): 4557-4562.
- [44] Gazit R, Chen D, Gershon G, *et al.* Low SWaP video core for MWIR imaging [C]// Proc. of SPIE, 2019, 11002: 110021W-1.
- [45] Malgorzata K, Artur K, Waldemar G. MOCVD Grown HgCdTe Barrier Structures for HOT Conditions [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2014, **61**(11): 3803-3807.
- [46] Sun Y, Han X, Hao H, *et al.* 320×256 short/mid-wavelength dual-color infrared focal plane arrays based on type-II InAs/GaSb superlattice [J]. *Infrared Phys. Technol*, 2017, **82**: 140-143.
- [47] Zhou Y, Chen J X, Xu Z C, *et al.* High quantum efficiency mid-wavelength interband cascade infrared photodetectors with one and two stages [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2016, **31**(8): 085005.
- [48] Chen Y J, Chai X L, Xie Z Y, *et al.* High Speed Mid-Infrared Interband Cascade Photodetector Based on InAs/GaSb Type-II Superlattice [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019.
- [49] Kopytko M, Antoni R. HgCdTe barrier infrared detectors [J]. *Prog. Quantum Electron*, 2016, **47**: 1-18.
- [50] Huang W, Li L, Lei L, *et al.* Minority carrier lifetime in mid-wavelength interband cascade infrared photodetectors [J]. *Appl. Phys. Lett*, 2018, **112**(25): 251107.
- [51] Palaferri D, Todorov Y, Bigioli A, *et al.* Room-temperature nine- μm -wavelength photodetectors and GHz-frequency heterodyne receivers [J]. *Nature*, 2018, **556**: 85-88.
- [52] Velicu S, Grein C H, Emelie P Y, *et al.* MWIR and LWIR HgCdTe Infrared Detectors Operated with Reduced Cooling Requirements [J]. *J. Electron. Mater*, 2010, **39**: 873-881.
- [53] Lei L, Li L, Ye H, *et al.* Long wavelength interband cascade infrared photodetectors operating at high temperatures [J]. *J. Appl. Phys*, 2016, **120**(19): 193102.
- [54] Michalczewski K, Pitrowski M, Wu C H, *et al.* Demonstration of HOT LWIR T2SL InAs/InAsSb photodetectors grown on GaAs substrate [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, **95**: 222-226.
- [55] Michalczewski K, Kebrowski A, Gawron W, *et al.* LWIR HgCdTe barrier photodiode with Auger-suppression [J]. *Semicond. Sci. Technol*, 2016, **31**(3): 035025.
- [56] <http://www.vigo.com.pl>
- [57] Giorgetta F R, Baumann E, Graf M, *et al.* Quantum Cascade Detectors [J]. *IEEE J. Quantum Electron*, 2009, **45**(8): 1039-1052.
- [58] Reiningger P, Schwarz B, Detz H, *et al.* Diagonal-transition quantum cascade detector [J]. *Appl. Phys. Lett*, 2014, **105**(9): 091108.
- [59] Antoni R, Kopytko M, Pitrowski M. Performance prediction of p-i-n HgCdTe long-wavelength infrared HOT photodiodes [J]. *Appl. Optics*, 2018, **57**(18): D11-D19.
- [60] Huang W, Rassela S, Li L, *et al.* A unified figure of merit for interband and intersubband cascade devices [J]. *Infrared Phys. Technol*, 2019, **96**: 298 - 301.
- [61] David Z T, Alexander S, Khoshakhlagh A, *et al.* Antimonide type-II superlattice barrier infrared detectors [C]// Proc. of SPIE, 2017, 10177: 101770N-1-10.
- [62] Sharifi H, Roebuck M, Terterian S, *et al.* Advances in III-V bulk and superlattice based high operating temperature MWIR detector technology [C]// Proc. of SPIE, 2017, 10177: 101770U-1-6.
- [63] Delaunay P Y, Noshob B Z, Gurga A R, *et al.* Advances in III-V based dual-band MWIR/LWIR FPAs at HRL [C]// Proc. of SPIE, 2017, 10177: 101770T-1-12.
- [64] Antoni R, Pitrowski M, Kopytko M. Type-II superlattice photodetectors versus HgCdTe photodiodes [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2019, **68**: 100228.